

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau ilmedia Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

L. Zentner / V. Böhm / K. Zimmermann / A. Huba

Ein Beitrag zu nichtkonventionellen fluidisch angetriebenen monolithischen nachgiebigen Aktoren

ABSTRACT

In diesem Beitrag werden fluidisch angetriebene monolithische elastomere Biegeaktoren mit speziellem Verformungsverhalten betrachtet. Nach diesem Verformungsverhalten führen die Aktoren unter steigendem Hohlraumdruck eine Richtungsumkehr in ihrer Biegeverformung aus. Im Mittelpunkt des Artikels stehen die analytische und numerische Untersuchung sowie die experimentelle Bestätigung des Umkehreffektes anhand mehrerer Konstruktionsvarianten. Vorteile und charakteristische Merkmale dieser Strukturen werden im Vergleich zu konventionellen Aktoren diskutiert.

1. EINLEITUNG

Eine spezifische Nachgiebigkeit technischer Systeme ist in vielen Bereichen der Technik, wie in der Mensch-Maschine Interaktion, Manipulations- bzw. Lokomotionstechnik oft eine dringende Voraussetzung. Die Nachgiebigkeit dieser Systeme wird entweder durch Kontrolle oder durch strukturelle, bzw. stoffliche Eigenschaften gewährleistet [1]. Der Vorteil der letzteren Möglichkeit besteht in der konstruktiven, herstellungs-, bzw. regelungstechnischen Einfachheit des Systems [1]. Fluidisch, bzw. thermofluidisch angetriebene elastomere Biegeaktoren sind derartige Strukturen, bei denen Antriebselemente und Mechanismenteile als eine nachgiebige monolithische Einheit realisiert werden können. Aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften, von welchen besonders die einfache Bauweise und große ausübbarer Bewegungsbereiche hervorzuheben sind, haben diese Aktoren auch in der Mikrotechnik eine Anwendung gefunden [2], [3], [4], [5]. Die Verformung derartiger stofflich und/oder geometrisch asymmetrischen Aktoren entsteht infolge ihrer Hohlraum-Druckbelastung, ihre maximale Biegedeformation ist durch die zulässige Stoffbeanspruchung begrenzt. Im Mittelpunkt von derzeitigen Entwicklungsaufgaben auf diesem Gebiet steht die Verbesserung von quantitativen Eigenschaften, wie z.B. die Erweiterung des Bewegungsbereiches bzw. der Belastbarkeit bei gleichzeitig kompakter Bauweise. Einheitlich

charakteristisches Merkmal der bekannten Strukturen ist, dass eine steigende oder sinkende Druckbelastung eine Bewegung des Aktor-Wirkelementes nur in eine Arbeitsrichtung bewirkt, bzw. dass die Grenze des Bewegungsbereiches vom maximalen Antriebsdruck bestimmt ist. Im Gegenteil dazu wird in der Arbeit ein qualitativ anderes Deformationsverhalten betrachtet. Nach diesem Deformationsprinzip führen die Aktor-Wirkelemente unter steigendem Hohlraumdruck eine Umkehr in ihrer Bewegung aus. Somit können in Abhängigkeit der Größe des steigenden Überdruckes Bewegungen in zwei entgegengesetzten Arbeitsrichtungen verwirklicht werden. Komplexe Bewegungspfade sind damit unkompliziert realisierbar. Ein weiteres charakteristisches Merkmal der zu betrachtenden Strukturen ist, dass der Bewegungsbereich der Aktor-Wirkelemente durch die geometrische Formgebung und Werkstoffeigenschaften in der ersten Arbeitsrichtung begrenzt ist. Zudem kann eine gegebene Lage des Aktor-Wirkelementes durch zwei verschiedene Druckbelastungen und somit mit entsprechend unterschiedlichen Festigkeiten realisiert werden.

2. REALISIERUNGSMÖGLICHKEITEN UND ERLÄUTERUNG DES EFFEKTES AM BEISPIEL I

Der zu betrachtende Effekt kann prinzipiell auf zwei Wege verwirklicht werden: (1) durch Kaskadierung von mehreren konventionellen Biegeaktoren oder (2) durch einen elementaren, nichtkonventionellen Aktor mit einer entsprechenden geometrischen und werkstoffseitigen Gestaltung. Fall (1) wird am Beispiel I in diesem Abschnitt und Fall (2) am Beispiel II in den Abschnitten 3,4,5 beschrieben.

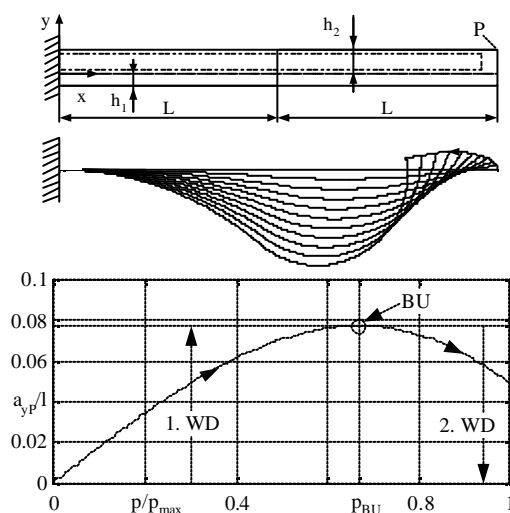


Bild 1: (o.): Schematische Darstellung der folienbeschichteten Struktur, (m.): Verformung bei steigendem Druck, (u.): Verschiebung des Endpunktes „P“ in die y-Richtung in Abhängigkeit des Antriebsdruckes. (BU): Ort der Bewegungsumkehr, (1. WD): 1. Arbeitsrichtung, (2. WD): 2. Arbeitsrichtung.

Als Beispiel I für den Fall (1) wird das im Bild 1 dargestellte, einfache Kontinuumsmodell - ein innendruckbelasteter, hohler Stab mit werkstoffseitiger Differenzierung - betrachtet. Die Arbeitsrichtung ist die y-Richtung, die Wirkelement-Bewegung bei steigendem Druck wird durch die Bewegung des Punktes „P“ charakterisiert. Der Stab besteht aus zwei Teilen gleicher Länge. In beiden Teilen ist eine undeformbare Folienschicht in der Längsrichtung eingebracht, so dass das Problem auf ein ebenes zurückzuführen ist. Es werden folgende Annahmen getroffen: (1) Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese und das Prinzip von Saint-Venant, (2) linear elastisches, isotropes Materialverhalten, (3) konstanter Stabquerschnitt, (4) keine Aufweitung des Querschnittes beider Stabteile.

Die Gleichgewichtsgleichungen nach der Theorie 2. Ordnung mit den getroffenen Annahmen lauten:

$$\frac{d\mathbf{k}_i}{ds} = 0, \quad \frac{d\mathbf{q}_i}{ds} = \mathbf{k}_i, \quad \frac{da_{xi}}{ds} = \cos \mathbf{q}_i, \quad \frac{da_{yi}}{ds} = \sin \mathbf{q}_i, \quad i=1,2. \quad (1)$$

Dabei charakterisieren κ_i die Krümmung, θ_i den Neigungswinkel der Tangente der Biegelinie zur x-Achse, a_{xi} und a_{yi} die Verschiebungen der Biegelinie für den jeweiligen Teil des Stabes. Der Parameter s bezeichnet die laufende Koordinate der Biegelinie. Die Randbedingungen der Verformungsgleichungen für $i=1$ sind: $\kappa_1(1)=f_D h_1$, $\theta_1(0)=0$, $a_{x1}(0)=0$, $a_{y1}(0)=0$. Eine Randbedingung und die Übergangsbedingungen für $i=2$ lauten: $\kappa_2(2)=f_D h_2 g$, $\theta_1(1)=\theta_2(1)$, $a_{x1}(1)=a_{x2}(1)$, $a_{y1}(1)=a_{y2}(1)$, mit $g=(E_1 I_1)/(E_2 I_2)$, wobei $E I_i$ die Biegesteifigkeiten sind. Die dimensionslosen Größen h , a_{xi} , a_{yi} und s sind die Quotienten zwischen den entsprechenden physikalischen Größen und der Länge L eines Stabteiles. Das Produkt aus der Krümmung und der Länge L ergibt κ_i für den jeweiligen Teil des Stabes. Für den Parameter f_D gilt: $f_D=(pAL^2)/(E_1 I_1)$, mit dem Innendruck p und der Innenquerschnittsfläche A des Stabes. Die Integration der Gleichgewichtsgleichungen ergibt als Lösung für den verformten Stab:

$$a_x = a_{x1} H(1-s) + a_{x2} H(s-1), \quad a_y = a_{y1} H(1-s) + a_{y2} H(s-1) \quad (2)$$

mit

$$H(s-s_0) = \begin{cases} 0, & s-s_0 < 0 \\ 1, & s-s_0 \geq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

bzw.:

$$\begin{aligned}
a_{x1} &= \frac{\sin(f_D h_1 s)}{f_D h_1}, & a_{x2} &= -\frac{\sin(f_D ((h_2 g - h_1) - h_2 g s))}{f_D h_2 g} + \frac{(h_2 g - h_1) \sin(f_D h_1)}{f_D h_1 h_2 g}, \\
a_{y1} &= \frac{\cos(f_D h_1 s) - 1}{f_D h_1}, & a_{y2} &= \frac{\cos(f_D ((h_2 g - h_1) - h_2 g s))}{f_D h_2 g} + \frac{(h_2 g - h_1) \cos(f_D h_1) - h_2 g}{f_D h_1 h_2 g}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Bei entsprechend gewählten Parameterwerten wird die y-Koordinate des Punktes „P“ bei Erhöhung des Hohlraumdruckes zunächst wachsen und dann ab $p=p_{BU}$ fallen. Das Wirkelement der Struktur führt bei $p=p_{BU}$ eine Umkehr in ihrer Bewegung aus (BU), wobei der Übergang von der ersten Arbeitsrichtung (1. WD) in die andere (2. WD) kontinuierlich ist. Resultierend aus dem Umkehreffekt können mit diesen Strukturen im Vergleich zur Funktionsweise herkömmlicher Aktoren zwei Arbeitsrichtungen mit Überdruck erreicht werden. Welche Bewegungsrichtung des Aktor- Wirkelementes ausgeführt wird, hängt von der Größe des Überdruckes ab. So kann mit einem auf dieser Weise arbeitenden Manipulationssystem wahlweise Außen- oder Innengreifen einfach ausgeführt werden. Da der Bewegungsbereich des Wirkelementes in der ersten Arbeitsrichtung unabhängig von der Größe des Überdruckes begrenzt ist, ist auch die vom Aktor erzeugte maximale Greifkraft in dieser Richtung beschränkt. Eine Überlastung des gegriffenen Objektes kann somit ausgeschlossen werden. Der hierfür sonst erforderliche zusätzliche sensorische Aufwand entfällt. Der Umkehreffekt ermöglicht mit weniger Aktoren und somit mit einfacher Ansteuerung die Realisierung komplexer Bewegungstrajektorien, die auch in Lokomotionsaufgaben von großer Bedeutung sind.

3. MODELLANNAHMEN, BERECHNUNGSMERKMALE FÜR DAS BEISPIEL II

Der monolithische Aufbau bzw. das Bestreben nach großen Bewegungsbereichen der Aktoren des Falles 2 verlangt nach Werkstoffen mit einer großen reversiblen Verformbarkeit und Dehnbarkeit. Diese Anforderungen werden von Elastomeren erfüllt, deren mechanische Werkstoffeigenschaften weitgehend nichtlinear sind [6], [7]. Die zu untersuchenden großen Bewegungsbereiche der Strukturen erfordern geometrisch nichtlineare Untersuchungen. Resultierend aus diesen Nichtlinearitäten und aus der komplexen dreidimensionalen Geometrie ist die analytische Beschreibung des Aktorverhaltens mit einem enormen Aufwand verbunden. Die weiteren Untersuchungen werden deshalb numerisch mit der Finite-Elemente-Methode (Programmpaket ANSYS® 6.1) unter Berücksichtigung von geometrischen und werkstoffseitigen Nichtlinearitäten durchgeführt. Das isotrope, ideal elastische Werkstoffverhalten wird qualitativ, mit dem physikalisch begründeten nichtlinearen Neo-Hooke'schem Materialmodell berücksichtigt

($a_{10}=0.125 \text{ N/mm}^2$). Es werden statische Berechnungen vorgenommen, die Druckbelastung wird schrittweise gleichmäßig verteilt im Aktor-Hohlraum aufgebracht. Es wird die Verschiebung des Aktor-Wirkelementes (charakterisiert durch den Punkt „P“) in Abhängigkeit der Druckbelastung ermittelt. Die Wirkung der Schwerkraft wird vernachlässigt.

4. FEM-UNTERSUCHUNGEN ZU DEM BEISPIEL II

Zunächst wird die im Bild 2 dargestellte hochelastische ebene Platte betrachtet. Die an einem Rand fest eingespannte, am anderen beweglich gelagerte Struktur wird gleichmäßig mit schrittweise steigendem Druck belastet. Es wird zwischen zwei Fällen unterschieden: im Fall (A) ist die Platte mit einer biegeschlaffen Folie versehen, im zweiten Fall (B) wird die Struktur ohne Folie betrachtet. Eine steigende Druckbelastung bewirkt im Fall (A) eine Krümmung der Struktur und die Verschiebung des beweglichen Randes in die negative x-Richtung. Ab einer bestimmten Belastung wird eine strukturabhängige Endform erreicht, die aufgebrachte Folie verhindert eine weitere Bewegung (Bild 2/l.). der Struktur. Im Fall (B) erfolgt bei steigender Last zunächst eine zum Fall (A) ähnliche Verformung des beweglichen Randes in die negative x-Richtung, große Verformungen sind mit kleiner Längsdehnung verbunden. Die Längsdehnung spielt mit der Druckerhöhung in der Bewegung der Struktur eine immer ausgeprägtere Rolle und löst bei einem bestimmten Druckwert eine Umkehr in der Verschiebung des beweglichen Randes aus. Eine weitere Laststeigerung führt zur Verschiebung des Randes in die positive x-Richtung (Bild 2/r.).

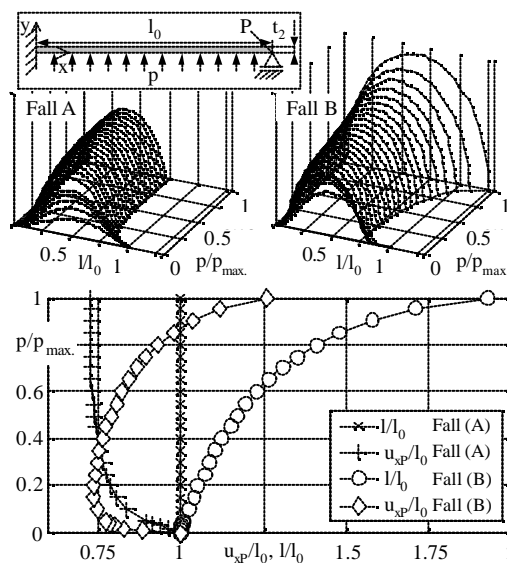


Bild 2: Querschnittsdarstellung der hochelastischen Platte, bzw. deren Verformung unter steigender Druckbelastung mit Folienbeschichtung – Fall A (l.) und ohne Folienbeschichtung – Fall (B) (r.). (u.): Verschiebung des Endpunktes „P“ und Längenänderung für beide Fälle.

Sinngemäß kann dieser Effekt mit der parallelen Kopplung und Verbindung von zwei Platten bzw. mit dem im Bild 3 dargestellten Aktor verwirklicht werden. Im Mikromaßstab hergestellte fluidisch angetriebene Aktoren aus hochelastischem Werkstoff mit ähnlicher Geometrie sind bereits in ([2], [3], [4]) erwähnt. Der Effekt der Bewegungsumkehr wurde in diesen Arbeiten nicht nachgewiesen, da sich die theoretische Beschreibung bzw. experimentelle Erprobung dieser Strukturen nur auf kleine Wirkelement-Verschiebungen in der ersten Bewegungsrichtung beschränkt hat.

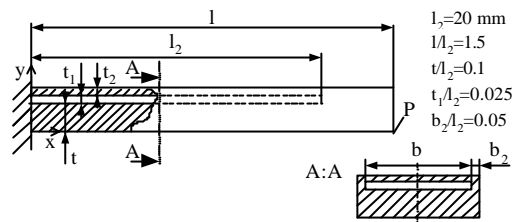


Bild 3: Der Aktor mit geometrischen Parametern.

Zunächst wird das Querschnittsmodell des Aktors (Bild 3) betrachtet. Dieses Modell ist zur qualitativen Beschreibung des Umkehreffektes für hinreichend große b/l_2 -Verhältnisse geeignet. Wie oben beschrieben erfolgt im Falle $t=t_2$ bei steigender Druckbelastung eine Umkehr in der axialen Bewegung des Aktor-Wirkelementes. Der Ort der Bewegungsumkehr $(u_{xP}/l)_{BU}$ ist bei gegebenen Werkstoffparametern vom t/l_2 -Verhältnis bestimmt. Eine konstruktive Asymmetrie, wie beispielsweise $t \neq t_2$, bewirkt bei Druckerhöhung die Änderung der Bewegungsrichtung des Wirkelementes. Resultierend aus der unterschiedlichen Nachgiebigkeit der mit t und t_2 charakterisierten Strukturteile erfolgt bei Druckbelastung eine Biegedeformation des Aktors - das Wirkelement beschreibt eine komplexe Bahn in der x - y Ebene. Die Bewegungsumkehr des Wirkelementes bleibt jedoch auch in diesem Fall ein charakteristisches Merkmal (Bild 4).

Die Lage der Umkehr $((u_{xP}/l)_{BU}, (u_{yP}/l)_{BU})$ und der Bewegungsbereich des Aktor-Wirkelementes sind in der ersten Arbeitsrichtung durch das Nachgiebigkeitsverhältnis zwischen dem oberen und unteren Strukturteil (charakterisierbar durch t/t_2), sowie durch ihr Verhältnis zur Länge des Innenraumes l wesentlich beeinflussbar. Der gleiche vorgegebene Bewegungsbereich kann in der ersten Arbeitsrichtung mit verschiedenen geometrischen Parameterkombinationen t/t_2 realisiert werden, wobei zu jeder Parameterkombination eine andere Strukturfestigkeit gehört. Das Bild 5 zeigt die erreichbare maximale Verschiebung des Endpunktes „P“ $((u_{yP}/l)_{max.})=(u_{yP}/l)_{BU}$ in der ersten Bewegungsrichtung (y -Richtung) bei Variation der Wandstärken t und t_2 .

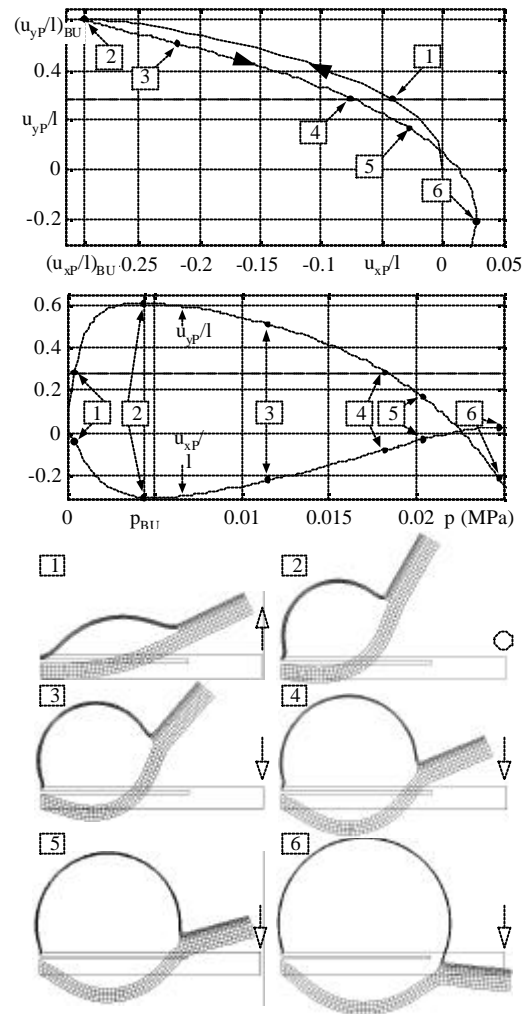


Bild 4: Formänderung des Aktors bzw. Verschiebung des Endpunktes „P“ bei steigendem Antriebsdruck für $t=0.1l_2$, $t/t_2=4$ (2D Modell). (Pfeile: Richtung der Wirkelement-Bewegung, O: Umkehrpunkt).

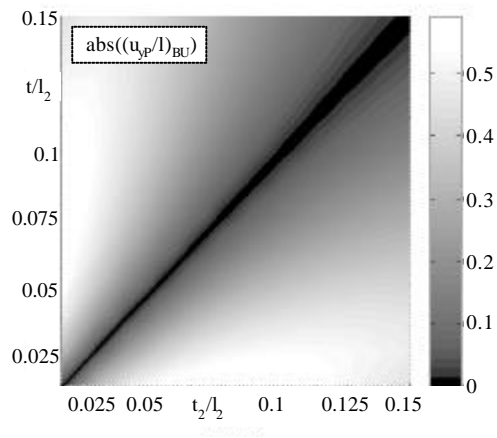


Bild 5: Maximale Verschiebung des Punktes „P“ in der ersten Arbeitsrichtung bei der Umkehr für Strukturvarianten mit unterschiedlichen Wandstärken „ t_1 “ und „ t_2 “ (weitere geometrische Parameter: s. Bild 3).

Im Folgenden wird das 3D Modell betrachtet. Das Bild 6 zeigt die verformten Zustände einer Strukturvariante bei steigendem Antriebsdruck. Die Deformationscharakteristik der 3D Modelle entspricht qualitativ der 2D Struktur, die Umkehr in der Bewegung des Aktor-Wirkelementes ist für jede untersuchte Strukturbreite zu beobachten.

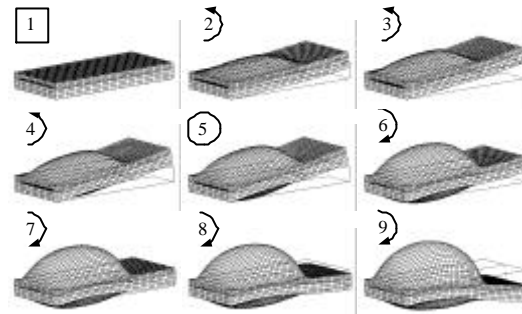


Bild 6: Verformung der Strukturvariante mit $t=0.1l_2$, $t/t_2=4$ (sonstige geometrische Parameter siehe Bild 3). ((1): Ausgangskonfiguration, (2-9): Verformung bei steigendem Hohlraumdruck, (5): Umkehr in der Wirkelement-Bewegung, Pfeile: Richtung der Wirkelement-Bewegung, O: Umkehrpunkt).

5. EXPERIMENTELLE BESTÄTIGUNG DES UMKEHREFFEKTS

Zur praktischen Erprobung des dargestellten Umkehreffektes wurden erste Makromodelle mit gekrümmter Längsachse mit unterschiedlichen t/t_2 -Verhältnissen aus Silikon-Elastomer hergestellt und getestet. Die experimentelle Untersuchungen bestätigen den Umkehreffekt, der zunächst theoretisch beschrieben wurde. Das Bild 7 zeigt die Verformung einer Strukturvariante bei steigendem Antriebsdruck.

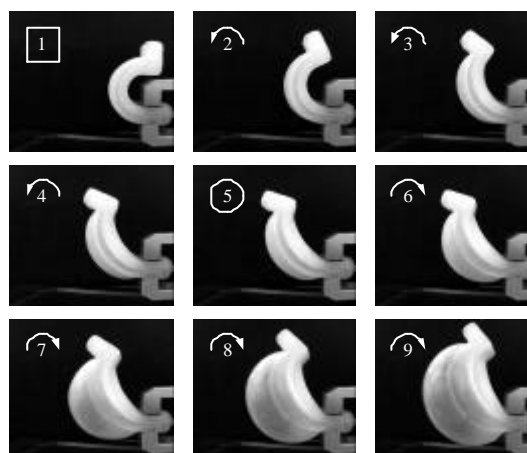


Bild 7: Verformung einer hergestellten Strukturvariante ((1): Ausgangskonfiguration, (2-9): Verformung bei steigendem Hohlraumdruck, (5): Umkehr in der Wirkelement-Bewegung, Pfeile: Richtung der Wirkelement-Bewegung, O: Umkehrpunkt).

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein neuer Effekt fluidisch angetriebener monolithischer miniaturisierbarer Biegeaktoren beschrieben und theoretisch und experimentell nachgewiesen. Charakteristische Merkmale der nach diesem Umkehreffekt arbeitenden Aktoren sind:

- sie führen ebene Biegebewegungen in zwei zueinander entgegengesetzten Arbeitsrichtungen aus, wobei beide Arbeitsrichtungen durch Überdruck-Aktivierung des Aktors ausgelöst werden,
- der Bewegungsbereich in der ersten Arbeitsrichtung ist unabhängig von der Größe der Druckbelastung konstruktiv bedingt begrenzt.

Die beschriebenen Aktoren zeichnen sich im Vergleich zu konventionellen miniaturisierten Biegeaktoren durch einen größeren Bewegungsbereich, größere Flexibilität und einen geringeren sensorischen Aufwand aus.

Die Untersuchungen wurden kofinanziert von OTKA T 048386.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] K. Suzumori, Elastic materials producing compliant robots, Robotics and Autonomous Systems 18 (1996) 135-140.
- [2] F. Kawai, P. Cusin, K. Konishi, Thin flexible end-effector using pneumatic balloon actuator, Sens. Actuators A Phys. 89 (2001) 28-35.
- [3] O. Tabata, et al., Micro fabricated tunable bending stiffness devices, Sens. Actuators, A Phys. 89 (2001) 119-123.
- [4] Y. Lu, C.-J. Kim, Micro-Finger Articulation by Pneumatic Parylene Balloons, IEEE Transducers '03 Conf. (2003) 276-279.
- [5] S. Mutzenich, et al., Analysis of a novel micro-hydraulic actuation for MEMS, Sens. Actuators A Phys. 116 (2004) 525-529.
- [6] A. Huba, L. Molnár: Dynamical Models of Silicone Rubbers Based on the Synthesis Method, Materials Science, Testing and Informatics, Trans Tech Publications Uetikon/Zürich (2002) 95-100.
- [7] A. Huba, L. Molnár, A. Czmerk, T. Fischl: Dynamic Analysis of Silicone Elastomers, Materials Science Forum, Trans Tech Publications Uetikon/Zürich Vol. 473-474 (2005) 85-90.

Autorenangaben:

PD Dr.-Ing. habil. Lena Zentner
Dipl.-Ing. Valter Böhm
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Zimmermann
TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau
D-98684 Ilmenau, PF 10 05 65
Tel.: (03677) 46-9014
Fax: (03677) 46-9060
E-mail: Lena.Zentner@tu-ilmenau.de
Valter.Boehm@tu-ilmenau.de
Klaus.Zimmermann@tu-ilmenau.de

PD Dr.-Ing. Antal Huba
TU Budapest, Fakultät für Maschinenbau
H-1521 Budapest, PF 91
Tel.: (0036) 1 463-2602
Fax: (0036) 1 463-3787
E-mail: Huba@mom.bme.hu